

Verschleißschutzbeschichtung und
Bauteil mit einer Verschleißschutzbeschichtung

Die Erfindung betrifft eine Verschleißschutzbeschichtung, insbesondere eine Erosionsschutzbeschichtung, vorzugsweise für Gasturbinenbauteile, nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Bauteil mit einer derartigen Verschleißschutzbeschichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 13.

Strömungsmechanisch belastete Bauteile, wie zum Beispiel Gasturbinenbauteile, unterliegen einem Verschleiß infolge von Oxidation, Korrosion und Erosion. Bei der Erosion handelt es sich um einen Verschleißvorgang, der durch in der Gasströmung mitbewegte, feste Stoffe hervorgerufen wird. Um die Lebensdauer von strömungsmechanisch belasteten Bauteilen zu verlängern, sind Verschleißschutzbeschichtungen erforderlich, welche die Bauteile vor Verschleiß schützen, insbesondere gegen Erosion, Korrosion und Oxidation.

Aus der EP 0 674 020 B1 ist ein mehrfachlagiger, erosionsresistenter Überzug für die Oberflächen von Substraten bekannt. Der dort offenbarte, erosionsresistente Überzug stellt eine Verschleißschutzbeschichtung bereit, die aus mehreren in Wiederholung auf dem zu beschichtenden Substrat aufgetragenen Mehrlagenschichtsystemen besteht. So sind bei der EP 0 674 020 B1 die in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme aus jeweils zwei unterschiedlichen Schichten gebildet, nämlich einerseits aus einer Schicht eines metallischen Materials und andererseits aus einer Schicht aus Titandiborid. Da bei der Erosionsschutzbeschichtung gemäß EP 0 674 020 B1 die in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme lediglich aus zwei Schichten gebildet sind, sind bei der dort offenbarten Erosionsschutzbeschichtung wechselweise Schichten aus metallischem Material und Schichten aus Titandiborid angeordnet.

Die EP 0 366 289 A1 offenbart eine weitere erosionsbeständige sowie korrosionsbeständige Beschichtung für ein Substrat. Auch gemäß der EP 0 366 289 A1 wird die Verschleißschutzbeschichtung aus mehreren, in Wiederholung auf dem zu beschichteten Substrat aufgetragenen Mehrlagenschichtsystemen gebildet, wobei jedes Mehrlagenschichtsystem

wiederum aus zwei unterschiedlichen Schichten besteht, nämlich aus einer metallischen Schicht, zum Beispiel aus Titan, und aus einer keramischen Schicht, zum Beispiel aus Titanitrid.

Eine weitere erosionsbeständige und abrasionsbeständige Verschleißschutzbeschichtung ist aus der EP 0 562 108 B1 bekannt. So ist die dort offenbarte Verschleißschutzbeschichtung wiederum aus mehreren in Wiederholung auf einem zu beschichtenden Substrat aufgetragenen Mehrlagenschichtsystemen gebildet. Die Fig. 4 der EP 0 562 108 B1 offenbart dabei eine aus mehreren, in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsystemen gebildete Verschleißschutzbeschichtung, wobei jedes Mehrlagenschichtsystem aus vier Schichten besteht, nämlich aus einer duktilen Schicht aus Wolfram oder einer Wolframlegierung und drei harten Schichten, wobei sich die drei harten Schichten hinsichtlich eines Zusatzelementsgehalts unterscheiden.

Hiervon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung das Problem zu Grunde, ein neuartige Verschleißschutzbeschichtung und ein Bauteil mit einer solchen Verschleißschutzbeschichtung zu schaffen.

Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass die eingangs genannte Verschleißschutzbeschichtung durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils des Patentanspruchs 1 weitergebildet ist. Erfindungsgemäß weist jedes der in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme mindestens vier unterschiedliche Schichten auf. Eine erste, der zu beschichtenden Oberfläche zugewandte Schicht jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metallwerkstoff gebildet. Eine auf die erste Schicht aufgetragene zweite Schicht jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metalllegierungswerkstoff gebildet. Eine auf die zweite Schicht aufgetragene dritte Schicht jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem gradierten Metall-Keramik-Werkstoff und eine auf die dritte Schicht aufgetragene vierte Schicht jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem nanostrukturierten Keramikwerkstoff gebildet.

Die erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung gewährleistet eine sehr gute Erosionsbeständigkeit sowie Oxidationsbeständigkeit und weist einen äußerst geringen Einfluss auf die Schwingfestigkeit des beschichteten Bauteils auf. Sie eignet sich insbesondere zur Beschichtung komplexer Bauteile, wie Leitschaufeln, Laufschaufeln, Leitschaufelsegmenten, Laufschaufelsegmenten sowie integral beschauften Rotoren.

Mehrere derartige Mehrlagenschichtsysteme sind in Wiederholung auf die Oberfläche des strömungsmechanisch beanspruchten Bauteils aufgebracht, wobei zwischen die Oberfläche des Bauteils und das sich an die Oberfläche anschließende, erste Mehrlagenschichtsystem vorzugsweise eine Haftvermittlungsschicht aufgebracht ist.

Das erfindungsgemäße Bauteil mit einer derartigen Verschleißschutzbeschichtung ist im unabhängigen Patentanspruch 13 definiert.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung. Ausführungsbeispiele der Erfindung werden, ohne hierauf beschränkt zu sein, an Hand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

- Fig. 1 eine stark schematisierte Darstellung einer Schaufel einer Gasturbine, die eine erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung aufweist;
- Fig. 2 einen stark schematisierten Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung nach einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- Fig. 3 einen stark schematisierten Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung nach einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung; und
- Fig. 4 einen stark schematisierten Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung nach einem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Nachfolgend wird die hier vorliegende Erfindung unter Bezugnahme auf Fig. 1 bis 4 in größerem Detail erläutert. Fig. 1 zeigt eine Schaufel einer Gasturbine in perspektivischer

Ansicht, die eine erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung trägt. Fig. 2 bis 4 zeigen schematisierte Querschnitte durch die Schaufel mit jeweils unterschiedlichen, erfindungsgemäßen Verschleißschutzbeschichtungen.

Fig. 1 zeigt eine Schaufel 10 einer Gasturbine mit einem Schaufelblatt 11 und einem Schaufelfuß 12. Im Ausführungsbeispiel der Fig. 1 ist die gesamte Schaufel 10, nämlich eine zu schützende Oberfläche derselben, mit einer Verschleißschutzbeschichtung 13 beschichtet. Obwohl im gezeigten Ausführungsbeispiel die komplette Schaufel 10 mit der Verschleißschutzbeschichtung 13 beschichtet ist, ist es auch möglich, dass die Schaufel 10 nur abschnittsweise, also nur im Bereich des Schaufelblatts 11 oder in Teilen davon oder im Bereich des Schaufelfußes 12, die Verschleißschutzbeschichtung 13 aufweist. Auch können andere Gasturbinenbauteile wie zum Beispiel Gehäuse oder integral beschauelte Rotoren wie Blisks (Bladed Disks) oder Blings (Bladed Rings) mit der Verschleißschutzbeschichtung 13 beschichtet sein.

In Fig. 2 ist das zu beschichtende Bauteil mit der Bezugsziffer 10 gekennzeichnet. Auf einer zu beschichtenden Oberfläche 14 des Bauteils 10 ist die erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung 13 aufgebracht. Im Ausführungsbeispiel der Fig. 2 besteht die Verschleißschutzbeschichtung 13 aus zwei auf der Oberfläche 14 in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsystemen 15 und 16. Jedes der beiden Mehrlagenschichtsysteme 15 und 16 besteht aus vier unterschiedlichen Schichten, wobei eine erste, der zu beschichtenden Oberfläche 14 zugewandte Schicht 17 jedes Mehrlagenschichtsystems 15 und 16 aus einem an die Zusammensetzung des zu beschichtenden Bauteils 10 angepassten Metallwerkstoff gebildet ist. Eine auf die erste Schicht 17 aufgetragene zweite Schicht 18 jedes Mehrlagenschichtsystems 15 und 16 ist aus einem an die Zusammensetzung des zu beschichtenden Bauteils 10 angepassten Metalllegierungswerkstoff gebildet. Eine auf die zweite Schicht 18 aufgetragene dritte Schicht 19 jedes Mehrlagenschichtsystems 15 und 16 ist aus einem gradierten Metall-Keramik-Werkstoff und eine auf die dritte Schicht 19 aufgetragene vierte Schicht 20 jedes Mehrlagenschichtsystems 15 und 16 ist aus einem Keramikwerkstoff gebildet. Der gradierte Metall-Keramik-Werkstoff innerhalb der Schicht 19 bildet einen Übergang zwischen der zweiten Schicht 18 und der vierten Schicht

20, nämlich von der Metallegierung der zweiten Schicht 18 zum Keramikwerkstoff der vierten Schicht 20.

Im Ausführungsbeispiel der Fig. 3 ist auf die oben beschriebenen Mehrlagenschichtsysteme 15 und 16 ein weiteres Mehrlagenschichtsystem 21 aufgebracht, welches hinsichtlich der Ausführung der einzelnen Schichten 17 bis 20 den Mehrlagenschichtsystemen 15 und 16 entspricht. Es können auch vier, fünf oder eine höhere Anzahl von derartigen Mehrlagenschichtsystemen 15, 16 bzw. 21 in Wiederholung übereinander angeordnet sein, um eine erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung 13 zu bilden. Die Mehrlagenschichtsysteme können auch aus mehr als vier Schichten zusammengesetzt bzw. gebildet sein.

Im Ausführungsbeispiel der Fig. 4 ist zwischen die Oberfläche 14 des zu beschichtenden Bauteils 10 und das sich an die Oberfläche 14 anschließende, erste Mehrlagenschichtsystem 15 eine Haftvermittlungsschicht 22 aufgebracht. Die Haftvermittlungsschicht 22 ermöglicht einen besseren Kontakt zwischen der erfindungsgemäßen Verschleißschutzbeschichtung 13 und dem zu beschichtenden Bauteil 10.

Die konkrete Ausführung der einzelnen Schichten 17 bis 20 der Mehrlagenschichtsysteme 15, 16 und 21 ist an die Werkstoffzusammensetzung des zu beschichtenden Bauteils 10 angepasst. Hierzu einige Beispiele:

Bei einem zu beschichtenden Bauteil 10, welches aus einem Nickelbasiswerkstoff oder Kobaltbasiswerkstoff oder Eisenbasiswerkstoff gebildet ist, ist die erste Schicht 17 vorzugsweise als Nickelschicht (Ni-Schicht) ausgebildet. Auf eine solche Ni-Schicht 17 ist dann eine aus einem Nickel-Chrom-Werkstoff gebildete zweite Schicht 18 (NiCr-Schicht) aufgebracht. An die zweite Schicht 18 aus dem Nickel-Chrom-Werkstoff schließt sich dann als dritte Schicht 19 eine gradierte Metall-Keramikschiicht an, die vorzugsweise aus einem CrN_{1-x} Werkstoff gebildet ist (CrN_{1-x} -Schicht). Die vierte Schicht 20 wird von einem Keramikwerkstoff, nämlich Chromnitrid, gebildet (CrN -Schicht).

Nach einem weiteren Beispiel ist das zu beschichtende Bauteil 10 aus einem Titanbasiswerkstoff gebildet. Bei einem derartigen, aus einem Titanbasiswerkstoff gebildeten, zu beschichtenden Bauteil 10 wird die erste Schicht 17 vorzugsweise aus Titan, Palladium oder Platin gebildet. Auf eine derartige, erste Schicht 17 ist dann eine zweite Schicht 18 aufgebracht, die von einem TiCrAl-Werkstoff oder einem CuAlCr-Werkstoff gebildet wird. Als dritte Schicht 19 schließt sich wiederum eine Gradierungsschicht an, die entweder aus einem CrAlN_{1-x} Werkstoff oder einem TiAlN_{1-x} Werkstoff gebildet ist. In dem Fall, in dem die Gradierungsschicht 19 von einem CrAlN_{1-x} Werkstoff gebildet ist, schließt sich als vierte Schicht 20 als keramische Schicht eine CrAlN-Schicht an. In dem Fall, in dem die Gradierungsschicht 19 von dem TiAlN_{1-x} Werkstoff gebildet ist, ist die vierte Schicht 20 vorzugsweise aus Titanaluminiumnitrid (TiAlN) gebildet. Anstelle des Titanaluminiumnitrid-Werkstoffs kann für die vierte Schicht 20 in diesem Fall jedoch auch ein TiAlSiN -Werkstoff oder AlTiN -Werkstoff oder TiN/AlN -Werkstoff als keramischer Werkstoff verwendet werden.

Die erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung 13 wird auf das zu beschichtende Bauteil 11 im Sinne der hier vorliegenden Erfindung mittels eines PVD-Beschichtungsprozesses aufgetragen. Die Schichtdicke eines Mehrlagenschichtsystems der erfindungsgemäßen Verschleißschutzbeschichtung beträgt vorzugsweise weniger als $15\text{ }\mu\text{m}$.

Die erfindungsgemäße Verschleißschutzbeschichtung findet bevorzugt Verwendung bei komplexen, dreidimensionalen, strömungsmechanisch beanspruchten Bauteilen, wie zum Beispiel Gehäuseelementen, Leitschaufelsegmenten, Laufschaufelsegmenten, integral beschauften Rotoren oder auch Einzelschaufeln für Flugtriebwerke. Mit der erfindungsgemäßen Verschleißschutzbeschichtung kann einerseits das gesamte zu beschichtende Bauteil sowie andererseits nur ein Bereich desselben beschichtet werden.

Patentansprüche

1. Verschleißschutzbeschichtung, insbesondere Erosionsschutzbeschichtung, die auf eine zu schützende Oberfläche eines strömungsmechanisch beanspruchten Bauteils, insbesondere eines Gasturbinenbauteils, aufgebracht ist, wobei die Verschleißschutzbeschichtung aus einem oder mehreren, in Wiederholung auf der zu beschichtenden Oberfläche aufgetragenen Mehrlagenschichtsystem gebildet ist, dadurch gekennzeichnet, dass jedes der einmal oder in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme (15, 16, 21) mindestens vier unterschiedliche Schichten (17, 18, 19, 20) aufweist, wobei eine erste, der zu beschichtenden Oberfläche (14) zugewandte Schicht (17) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metallwerkstoff gebildet ist, wobei eine auf die erste Schicht (17) aufgetragene zweite Schicht (18) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metalllegierungswerkstoff gebildet ist, wobei eine auf die zweite Schicht (18) aufgetragene dritte Schicht (19) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem gradierten Metall-Keramik-Werkstoff gebildet ist, und wobei eine auf die dritte Schicht (19) aufgetragene vierte Schicht (20) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem nanostrukturierten Keramikwerkstoff gebildet ist.
2. Verschleißschutzbeschichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jedes der in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme (15, 16, 21) einen gleichen Schichtaufbau aufweist.
3. Verschleißschutzbeschichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Schicht (17) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Nickelbasis- oder Kobaltbasis- oder Eisenbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem Nickelwerkstoff oder Kobaltwerkstoff gebildet ist.

4. Verschleißschutzbeschichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet,
dass die zweite Schicht (18) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Nickelbasis- oder Kobaltbasis- oder Eisenbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem Nickellegierungswerkstoff, vorzugsweise aus einem NiCr-Werkstoff, oder aus einem Kobaltlegierungswerkstoff oder einem Eisenlegierungswerkstoff gebildet ist.
5. Verschleißschutzbeschichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet,
dass die dritte Schicht (19) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Nickelbasis- oder Kobaltbasis- oder Eisenbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus CrN_{1-x} Werkstoff gebildet ist.
6. Verschleißschutzbeschichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet,
dass die vierte Schicht (20) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Nickelbasis- oder Kobaltbasis- oder Eisenbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem CrN-Werkstoff gebildet und nanostrukturiert ist.
7. Verschleißschutzbeschichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
dass die erste Schicht (17) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Titanbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem Titanwerkstoff oder Platinwerkstoff oder Palladiumwerkstoff gebildet ist.
8. Verschleißschutzbeschichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet,
dass die zweite Schicht (18) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Titanbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem Titanlegierungswerkstoff oder einem Aluminiumlegierungswerkstoff, vorzugsweise aus einem TiCrAl-Werkstoff oder einem CuAlCr-Werkstoff, gebildet ist.

9. Verschleißschutzbeschichtung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die dritte Schicht (19) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Titanbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem CrAlN_{1-x} Werkstoff oder aus einem TiAlN_{1-x} Werkstoff gebildet ist.
10. Verschleißschutzbeschichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die vierte Schicht (20) jedes Mehrlagenschichtsystems bei einem aus einem Titanbasiswerkstoff gebildeten Bauteil aus einem CrAlN -Werkstoff oder aus einem TiAlN -Werkstoff oder aus einem TiAlSiN -Werkstoff oder aus einem TiN/AlN -Werkstoff gebildet und nanostrukturiert ist.
11. Verschleißschutzbeschichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Gesamtschichtdicke der Schichten (17, 18, 19, 20) jedes Mehrlagenschichtsystems kleiner als $15\mu\text{m}$ ist.
12. Verschleißschutzbeschichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass in Wiederholung mehrere derartige Mehrlagenschichtsysteme auf die Oberfläche (14) des strömungsmechanisch beanspruchten Bauteils (11) aufgebracht sind, wobei zwischen die Oberfläche (14) des Bauteils (11) und das sich an die Oberfläche (14) anschließende, erste Mehrlagenschichtsystem (15) eine Haftvermittlungsschicht (22) aufgebracht ist.
13. Bauteil, insbesondere Gasturbinenbauteil, mit einer Verschleißschutzbeschichtung, insbesondere mit einer Erosionsschutzbeschichtung, die auf eine zu schützende Oberfläche des strömungsmechanisch beanspruchten Bauteils aufgebracht ist, wobei die Verschleißschutzbeschichtung (13) aus einem oder mehreren, in Wiederholung auf der zu beschichtenden Oberfläche (14) aufgetragenen Mehrlagenschichtsystem (15, 16, 21) gebildet ist,

dadurch gekennzeichnet,

dass jedes der einfach oder in Wiederholung aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme mindestens vier unterschiedliche Schichten (17, 18, 19, 20) aufweist, wobei eine erste, der zu beschichtenden Oberfläche (14) zugewandte Schicht (17) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metallwerkstoff gebildet ist, wobei eine auf die erste Schicht (17) aufgetragene zweite Schicht (18) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metalllegierungswerkstoff gebildet ist, wobei eine auf die zweite Schicht (18) aufgetragene dritte Schicht (19) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem gradierten Metall-Keramik-Werkstoff gebildet ist, und wobei eine auf die dritte Schicht (19) aufgetragene vierte Schicht (20) jedes Mehrlagenschichtsystems aus einem nanostrukturierten Keramikwerkstoff gebildet ist.

14. Bauteil nach Anspruch 13,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Verschleißschutzbeschichtung (13) nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 12 ausgebildet ist.

15. Bauteil nach Anspruch 13 oder 14,

dadurch gekennzeichnet

dass dasselbe als Gehäuse oder Leitschaufel oder Laufschaufel oder Leitschaufelsegment oder Laufschaufelsegment oder integral beschauelter Rotor einer Gasturbine, insbesondere eines Flugtriebwerks, ausgebildet ist.

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Verschleißschutzbeschichtung, insbesondere eine Erosionsschutzbeschichtung, für ein strömungsmechanisch beanspruchtes Bauteil.

Erfindungsgemäß weist die Verschleißschutzbeschichtung ein oder mehrere, in Wiederholung auf der zu beschichtenden Oberfläche aufgetragene Mehrlagenschichtsysteme (15, 16) auf, wobei jedes der aufgetragenen Mehrlagenschichtsysteme (15, 16) mindestens vier unterschiedliche Schichten aufweist. Eine erste, der zu beschichtenden Oberfläche zugewandte Schicht (17) jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metallwerkstoff gebildet. Eine auf die erste Schicht aufgetragene zweite Schicht (18) jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem an die Zusammensetzung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche angepassten Metalllegierungswerkstoff gebildet. Eine auf die zweite Schicht aufgetragene dritte Schicht (19) jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem gradierten Metall-Keramik-Werkstoff und eine auf die dritte Schicht aufgetragene vierte Schicht (20) jedes Mehrlagenschichtsystems ist aus einem nanostrukturierten Keramikwerkstoff gebildet.

(Fig. 2)